

# ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СУБМИКРОСТАЛЛИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ В НИКЕЛЕ ПОСЛЕ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ КРУЧЕНИЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

*И.А. Дитенберг<sup>1</sup>, Е.А. Корзникова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

<sup>2</sup> Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа  
helenne@yandex.ru

Как известно [1, 2], субмикрокристаллические (СМК) и наноструктурные (НС) материалы, полученные методами интенсивной пластической деформации (ИПД) характеризуются исключительно сложным высодефектным структурным состоянием. Типичной особенностью таких состояний является наличие высокой плотности дефектов кристаллического строения в объёме субмикрорезервов и нанорезервов, а также высоконеравновесное состояние их границ. К сожалению, несмотря на большое количество экспериментальных данных, полная аттестация этих структурных состояний до сих пор отсутствует. Более того, эти состояния оказываются различными в зависимости от методов их получения. Также стоит отметить, что в настоящее время имеется небольшое число работ по детальному изучению взаимосвязи структурных особенностей и механических свойств.

Ранее для аттестации высокодефектных СМК и НС состояний в металлических материалах, полученных ИПД кручением под давлением и равноканальным угловым прессованием, было предложено использовать специальные методы электронномикроскопического анализа [3...6], которые позволяют обнаружить новые особенности границ субмикрокристаллов и дефектной структуры в объёме зерен. Эти методы были эффективно использованы для исследования субмикрокристаллических никеля [3], меди [4].

В настоящей работе с использованием этих методов проведено исследование СМК Ni (99,998 %), полученного кручением под давлением. Изучены характеристики зеренной структуры, особенности высокодефектной субструктуры объёма и границ зерен, оценены поля локальных внутренних напряжений на микромасштабном уровне, и проведено обсуждение возможных механизмов переориентации кристаллической решётки в процессе ИПД.

Образцы в форме дисков диаметром 8 мм и толщиной  $h = 0,8$  мм деформировали кручением под давлением  $\sim 4$  ГПа при числе оборотов диска  $N = 5$ . Толщина дисков после деформации составляла 0,6 мм. Величины сдвиговой ( $\gamma = 2\pi NR/h$ ) и истинной логарифмической ( $\epsilon = \ln\gamma$ ) деформаций в зависимости от расстояния от центра деформируемого диска

( $R = 1,5 \dots 3,5$  мм) изменяются при этом в пределах от  $\gamma \approx 78,5$ ,  $\epsilon \approx 4,36$  ( $R = 1,5$  мм) до  $\gamma \approx 183,2$ ,  $\epsilon \approx 5,21$  ( $R = 3,5$  мм).

Для изучения структурных состояний с высокой кривизной кристаллической решетки применялись специальные методы электронномикроскопического анализа высоких непрерывных разориентировок [3...5], позволяющие выделить структурную (присущую объемным образцам) кривизну кристаллической решетки. Электронномикроскопическое исследование проведено преимущественно в сечении перпендикулярном плоскости наковален, что позволяет получать количественные характеристики формирующейся при деформации кручением под давлением анизотропии микроструктуры [3].

В процессе электронномикроскопического анализа установлено, что после кручения под давлением на пять оборотов в образцах формируется сложное высокодефектное состояние, характеризующееся высокой неоднородностью микроструктуры. На рис. 1 приведен пример типичного для этого состояния светлопольного изображения (а) и соответствующей картины микродифракции (б), полученные при исследовании сечения перпендикулярного плоскости наковален.

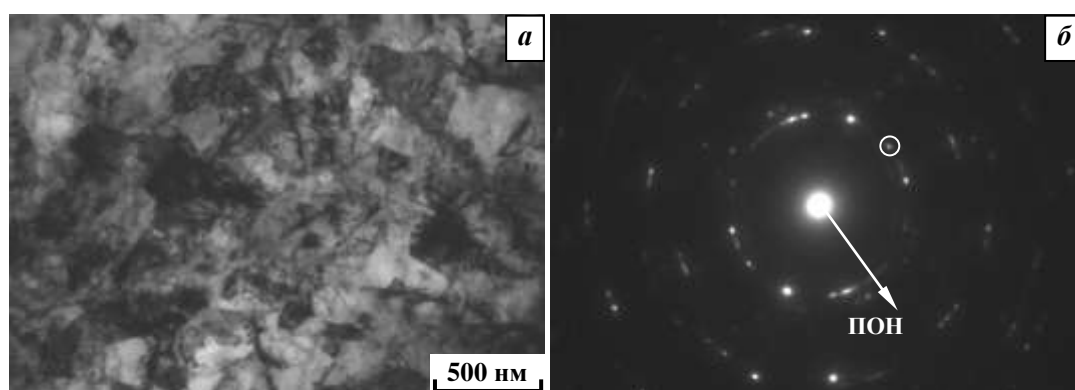


Рисунок 1. Типичное светлопольное изображение микроструктуры (а) и соответствующая картина микродифракции (б) после кручения под давлением при  $N = 5$ . Сечение, перпендикулярное плоскости наковален

Для количественного определения параметров микроструктуры был проведен темнопольный анализ дискретных и непрерывных разориентировок [6], в результате которого установлено, что в материале формируется СМК состояние, характеризующееся высокой неоднородностью и анизотропией кристаллической структуры. А именно: чередованием участков с неравноосными кристаллитами и кристаллитами, имеющими форму, близкую к равноосной. В участках с неравноосными кристаллитами в направлении, параллельном оси кручения, их размеры не превышают 0,15 мкм, в направлении, параллельном плоскости наковален,

они вытянуты до микрона и более. Кривизна кристаллической решетки в таких участках достигает значений  $\sim 10...20$  град/мкм. Размеры равноосных субмикроструктур лежат в интервале от 0,05 до 1 мкм. Были также обнаружены области размером около 0,5 мкм в которых структурного состояния с высокой кривизной кристаллической решетки не обнаружено. Образование подобных участков структуры, вероятно, является следствием протекания процессов типа динамической рекристаллизации.

Другой важной особенностью, оказывающей существенное влияние на характер неоднородности микроструктуры, является формирование двойников деформации. При этом пачки нанодвойников наблюдаются в субмикроструктурах размерами от нескольких десятков нанометров до 1 мкм.

#### Используемые литературные источники:

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические системы М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. С. 398с.: ил.
2. Носкова Н.И., Мулюков Р.Р. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 279 с.
3. Тюменцев А.Н., Дитенберг И.А., Пинжин Ю.П. и др. Особенности микроструктуры и механизмы формирования субмикроструктурной меди, полученной методами интенсивной пластической деформации. // ФММ, 2003. Т.96. №4. С. 33-43.
4. Тюменцев А.Н., Пинжин Ю.П., Коротаев А.Д. и др. Электронномикроскопическое исследование границ зёрен в ультрамелкозернистом никеле, полученном интенсивной пластической деформацией // ФММ, 1998. Т. 86. Вып. 6. С. 110-120.
5. Tyumentsev A. N. Metal Microstructure After Large Plastic Deformations: Models and TEM Possibilities. // Electron Microscopy and Multiscale Modeling EMMM-2007. Proceedings of The EMMM-2007 International Conference, 3-7 September 2007, Moscow, Russia – Edited by A. S. Avilov, S. L. Dudarev and I. D. Marks. – 2007. – P. 268-285.
6. Е.А. Корзникова, И.А. Дитенберг, А.Н. Тюменцев. «Особенности микроструктуры и механизмы формирования субмикроструктурного состояния в никеле после больших пластических деформаций кручением под давлением. Сборник трудов XVII Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» / Самара, 2009, с. 131-137.